

Sistema para evaluar el grado de atención y aprovechamiento de estudiantes en correlación con la actividad ocular durante una actividad de comprensión lectora en computadora

Miguel Ángel Ramírez-Flores¹, María Antonieta Abud-Figueroa¹,
Mario Andrés Paredes-Valverde², Ignacio López-Martínez¹,
Ulises Juárez-Martínez¹

¹ Tecnológico Nacional de México,
Instituto Tecnológico de Orizaba,
División de Investigación y Estudios de Posgrado,
México

² Tecnológico Nacional de México,
Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán,
División de Estudios de Posgrado e Investigación,
México

{M21011181, maria.af, ulises.jm,
ignacio.lm}@orizaba.tecnm.mx,
mario.pv@teziutlan.tecnm.mx

Resumen. El presente trabajo describe el diseño y desarrollo de un sistema Web para dar soporte a la evaluación del grado de atención y aprovechamiento de estudiantes del primer año de secundaria durante una actividad de comprensión lectora en computadora. El software obtenido implementa técnicas de seguimiento ocular basadas en visión artificial, utilizando GazeCloudAPI y una cámara web convencional para registrar el seguimiento de la actividad ocular de los alumnos durante una lectura de comprensión. Para llevar a cabo la evaluación, se utilizó la prueba del Desarrollo de Movimiento Ocular (DEM), una lectura de comprensión ajustada a la cantidad de palabras de acuerdo al nivel de los estudiantes y una serie de preguntas y respuestas. Además, se llevó a cabo el análisis y categorización del mapa de calor generado durante el proceso de lectura utilizando las proporciones de color presentes en la imagen. La primera versión del sistema propuesto logró clasificar de manera similar a más del 65% de los evaluados con la clasificación obtenida en el aula. La principal ventaja de este sistema es que brinda una herramienta docente para obtener, analizar y visualizar la actividad ocular durante la lectura en computadora, lo que permite detectar problemas de atención y aprendizaje en los estudiantes y tomar medidas tempranas para mejorar su desempeño académico.

Palabras clave: Visión artificial, comprensión lectora, seguimiento ocular, desempeño académico.

System for Evaluation of the Degree of Attention and Achievement of Students in Connection with Ocular Activity During a Computer-Based Reading Comprehension Activity

Abstract. This paper describes the design and development of a web system to support the evaluation of the level of attention and performance of first-year middle school students during a computer-based reading comprehension activity. The obtained software implements eye-tracking techniques based on artificial vision, using GazeCloudAPI and a conventional webcam to record students' eye activity during a reading comprehension task. To carry out the evaluation, the Developmental Eye Movement (DEM) test was used, as well as a reading comprehension text adjusted to the students' level and a set of questions and answers. Additionally, the analysis and categorization of the heatmap generated during the reading process was carried out using the color proportions present in the image. The first version of the proposed system was able to classify more than 65% of the evaluated students similarly to the classification obtained in the classroom. The main advantage of this system is that it provides a teaching tool to obtain, analyze and visualize eye activity during computer-based reading, which allows for the detection of attention and learning problems in students and the early implementation of measures to improve their academic performance.

Keywords: Artificial vision, reading comprehension, eye tracking, academic performance.

1. Introducción

El bajo desempeño académico es un problema que afecta a muchos estudiantes en todo el mundo, independientemente de su nivel educativo. Si bien, este problema está relacionado con factores tales como falta de motivación, ansiedad, estrés y depresión, también está vinculado a la forma en que se enseña y se aprende.

Uno de los principales factores que se asocia con el bajo aprovechamiento académico es la falta de comprensión lectora, ya que limita la capacidad de aprendizaje de los estudiantes y contribuye a un bajo desempeño escolar. Muchos estudiantes tienen dificultades para entender lo que leen, lo que afecta significativamente su desempeño académico.

En México, muchos niños y jóvenes tienen dificultades para leer y comprender textos, lo que afecta su desempeño académico y los resultados generales del aprendizaje. Los resultados publicados por el Programa Internacional para la Evaluación de Estudiantes (PISA) en el 2018 indican que el 35% de los estudiantes mexicanos no alcanzó el nivel mínimo de competencia en tres áreas del conocimiento, destacando la comprensión lectora como uno de los mayores problemas [1].

Es esencial identificar y abordar los problemas de aprendizaje temprano para minimizar las consecuencias del bajo desempeño académico en los estudiantes. Con los avances actuales en tecnología, la educación aprovecha el uso de recursos tecnológicos para mejorar el desempeño académico y mitigar los problemas de comprensión lectora.

En este sentido, el análisis de la mirada mientras se realiza una lectura es una de las áreas de interés tecnológico para la educación. El seguimiento ocular es una herramienta cada vez más valiosa en la investigación sobre el comportamiento visual y la interacción de los estudiantes durante la lectura. Analizando la actividad ocular de los estudiantes, es posible identificar problemas de atención y aprendizaje que podrían estar afectando su desempeño académico [2].

Con base en lo antes mencionado, este trabajo describe el desarrollo de un componente de software que utiliza técnicas de seguimiento ocular basadas en visión artificial para obtener la actividad ocular de estudiantes de nivel secundaria, mediante una cámara web convencional, lo que facilita su implementación en un entorno educativo.

El objetivo principal de este componente es analizar la correlación entre la comprensión lectora y la actividad ocular de un estudiante durante el proceso de aprendizaje. La contribución de este trabajo es proporcionar una herramienta docente que permita la obtención, análisis y visualización de la actividad ocular de los estudiantes, así como una evaluación y aproximación de la comprensión de los estudiantes durante la lectura en computadora.

El resto de este manuscrito se estructura de la siguiente manera. El capítulo 2 presenta los trabajos más relacionados con el presente proyecto, mientras que el diseño y desarrollo del sistema propuesto son descritos en el capítulo 3. El capítulo 4 muestra los resultados obtenidos de la aplicación del software desarrollado a un grupo de nivel secundaria. Finalmente, las conclusiones y trabajo a futuro se discuten en el capítulo 5.

2. Trabajos relacionados

En esta sección se describen y discuten algunos de los trabajos más relevantes en el contexto de detección del nivel de comprensión en la lectura mediante el análisis de movimientos oculares. En el estudio presentado en [3], se propuso un enfoque para mejorar la comprensión lectora a través del análisis de datos de seguimiento ocular y características del texto. Se utilizó una detección automática para generar anotaciones en forma de traducción de palabras o resumen de oraciones complejas.

En el estudio piloto, se logró una precisión promedio del $80,6\% \pm 6,3\%$ en la anotación generada automáticamente, lo que mejoró la eficiencia de lectura en inglés. Finalmente, este trabajo obtuvo una herramienta útil para mejorar la comprensión lectora en diferentes contextos.

En [4], se utilizó el rastreador ocular GazePoint® GP3 HD para investigar los problemas de los estudiantes de programación y sus estrategias de aprendizaje. Participaron 36 universitarios y se encontró que los estudiantes adoptaban diferentes estrategias de aprendizaje para diferentes tipos de sentencias de programación.

Se observó un aumento en las fijaciones oculares en los apuntes de clase para los alumnos que no comprendían del todo la estructura del código, lo que se utilizó como un indicador temprano para determinar el nivel de aprendizaje de los alumnos.

En [5], se investigaron los patrones de comportamiento durante la lectura. Para ello, se registraron los movimientos oculares de 32 participantes mediante el rastreador Tobii® X2-30 y se propuso un modelo en dos etapas, donde los usuarios primero

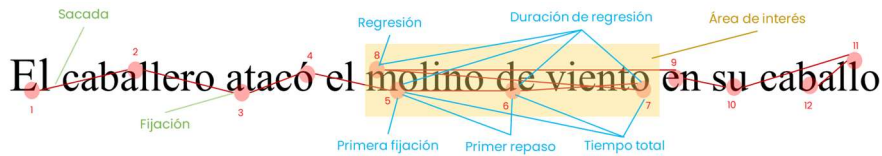


Fig. 1. Actividad ocular de un usuario durante una lectura.

buscan respuestas en el documento y luego realizan la verificación entre las respuestas candidatas.

Los resultados sugieren que el modelo obtenido mejora el desempeño y ayuda a comprender cómo los humanos leen y buscan respuestas. En [6] se analizó el uso de tecnologías de seguimiento ocular para medir el procesamiento cognitivo en un entorno de aprendizaje en línea.

Se recopilaron datos en tiempo real sobre el estado cognitivo de los usuarios, como la atención, la concentración, el cansancio, la relajación, el estrés y el éxito en la resolución de tareas. Los datos obtenidos permitieron el desarrollo de un sistema llamado Protus®, que utiliza tecnologías de reconocimiento ocular para identificar automáticamente el estado de aprendizaje y el estado mental/emocional del usuario.

Por otro lado, en [7], se exploraron métodos para clasificar el nivel de comprensión de un lector utilizando el EyeLink® 1000 como rastreador ocular. Se utilizaron modelos de red profunda para predecir la comprensión de lectura general con un nivel de precisión del 65%.

Los modelos que predijeron las otras variables consideradas no tuvieron un mejor desempeño que la precisión nula, excepto para el primer pasaje, donde la red neuronal convencional (CNN) es ligeramente mejor. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para las comunidades de investigación sobre educación, aprendizaje y capacitación.

En [8], se presentó un sistema de lectura interactivo controlado por los ojos utilizando el Gazepoint® GP3 (ECIRS) en lugar del ratón para controlar el texto digital. Se realizó un experimento comparativo entre un grupo de estudiantes que utilizaron ECIRS y otro grupo que utilizó un sistema de lectura interactivo controlado por ratón (MCIRS) para leer dos tipos de textos en inglés.

Los resultados mostraron que el grupo de ECIRS superó significativamente al grupo de MCIRS en la comprensión lectora del artículo y mejoró la comprensión lectora de los estudiantes independientemente del campo más que la de los estudiantes dependientes del campo. En [9], se propone una relación entre las medidas de movimiento ocular y la predicción de la comprensión lectora.

Se desarrolló una red neuronal para predecir puntajes de comprensión subjetiva y puntajes de cuestionarios. La intensidad lectora se relacionó directamente con la comprensión y, la información obtenida permitió crear entornos de aprendizaje dinámicos que usen el movimiento de los ojos para predecir la dificultad de las preguntas y proporcionar retroalimentación a los instructores sobre el comportamiento de los estudiantes.

El trabajo presentado en [10] describe un enfoque automático que utiliza el método de agrupamiento K-means para analizar el movimiento ocular durante la lectura de un texto de divulgación científica utilizando el rastreador ocular Tobii® EyeX. El análisis

Tabla 1. Precio al público de Eye Trackers.

Compañía	Producto	Precio de venta (aprox)
Tobii-pro®	Tobii Eye Tracker 5	\$307.33 USD
	Tobii X2 – 30 Hz	\$15,000 USD
Eye-link®	EyeLink 1000 plus	\$22,950 USD
Smart-eye®	Smart Eye AI-X	\$2,345 USD
Gaze-point®	GazePoint GP3 HD	\$2,250 USD

identificó tres patrones de comportamiento de lectura. El estudio contribuyó al campo de la enseñanza al proporcionar evidencia y recomendaciones de la importancia del posicionamiento de elementos visuales durante el aprendizaje.

En el estudio descrito en [11] se desarrollaron algoritmos para combinar los datos obtenidos del rastreador ocular GazePoint GP3® con los patrones de lectura que se producen durante la comprensión de un texto.

Esto permitió la creación de diversas funcionalidades, tales como la evaluación de la comprensión, la detección del nivel de interés y el desplazamiento automático. Como resultado de esta combinación, se logró una precisión del 27 % superior en la detección en comparación con el seguimiento realizado solamente por el rastreador ocular.

En [12], se investigó la posibilidad de predecir el nivel de comprensión lectora mediante el análisis del movimiento ocular. Se utilizó el rastreador ocular Tobii® X1 Light para analizar el patrón de movimiento ocular de 10 estudiantes de posgrado no hablantes de inglés mientras leían artículos en inglés de diferentes niveles de dificultad.

Se aplicaron técnicas de aprendizaje automático para identificar características en el reconocimiento de la comprensión de los lectores, logrando un modelo que identifica diferentes niveles de comprensión con una mejora del rendimiento del 30% por encima de la referencia.

El resumen, el campo de la investigación de los movimientos oculares y su relación con la comprensión lectora está en constante expansión, incluyendo el uso de técnicas de seguimiento ocular en la lectura de texto impreso y la detección de patrones de movimiento ocular en la lectura en línea.

Se desarrollaron diferentes enfoques para modelar y predecir el nivel de comprensión de la lectura a partir de los datos de seguimiento ocular mediante herramientas de alta precisión.

En este sentido, se examinaron estudios relacionados con la aplicación de rastreadores oculares en la educación y se concluye que existe una buena oportunidad para desarrollar un sistema basado en visión por computadora de costo accesible para su implementación en instituciones educativas.

Esto permitiría obtener datos de los registros oculares utilizando cámaras web convencionales y métodos de evaluación durante una lectura de comprensión, contribuyendo con una herramienta para los docentes que les permita clasificar el aprovechamiento de los alumnos durante una lectura de comprensión y realizar acciones prematuras que eviten problemas relacionados con el bajo desempeño escolar.

Tabla 2. Herramientas de seguimiento ocular.

Característica	Trackin.js	GazeRecorder	WebGazer.js	RealEye
Tiempo de rastreo	1 min	1 min	--	45 s
Visualización de actividad ocular	×	Mapa de calor/Video	×	✓
Personalización	✓	✓	×	×
Calibración	✓	✓	✓	✓
Uso de Webcam	✓	✓	✓	✓
Código abierto	✓	✓	✓	×
Versión premium	×	✓	×	✓

3. Desarrollo propuesto

Esta sección describe las características y funcionalidades más representativas del sistema propuesto, además, se discuten diferentes aspectos tecnológicos que han sentado las bases para el desarrollo de este.

3.1. Análisis del entorno de los rastreadores oculares actuales

El seguimiento ocular es un conjunto de dispositivos, técnicas y mecanismos tecnológicos que permiten detectar la presencia de una persona y seguir en tiempo real lo que están mirando. La tecnología convierte los movimientos oculares en datos que contienen información como la posición de la pupila, el vector de la mirada para cada ojo y el punto de enfoque, lo que logra utilizarse como una modalidad de entrada adicional en diversas aplicaciones.

Esta tecnología ofrece una amplia gama de aplicaciones y beneficios en el análisis y seguimiento de los movimientos oculares de las personas [13]. Los dispositivos que se utilizan para rastrear el movimiento de los ojos se denominan eye trackers y aunque la tecnología de eye-tracking aparentemente parece un término reciente, los primeros intentos de rastrear los movimientos del ojo comenzaron a fines del siglo XIX y no del todo agradables para los participantes del estudio.

En aquel entonces, los participantes en los estudios se veían obligados a llevar un molde de yeso cubriendo el ojo con varillas que sobresalían hacia fuera para indicar la posición del ojo en relación con el objeto observado. A medida que avanzó la tecnología, se desarrollaron rastreadores oculares que aún requerían cubiertas para los ojos, pero utilizaban dispositivos similares a los lentes de contacto modernos [14].

Estos dispositivos tecnológicos se idearon para visualizar la atención visual mediante la recolección de movimientos oculares cuando se exponen a diferentes estímulos (tal como se ilustra en la Figura 1). La tecnología de seguimiento ocular permite capturar los datos de la mirada para analizarlos e identificar problemas específicos o predecir su comportamiento.

Los movimientos oculares revelan información sobre cómo el usuario se comporta. Analizando la mirada es posible identificar lo que se ve, en qué orden y durante cuánto tiempo, información que es valiosa para identificar qué hace el alumno mientras realiza una lectura y utilizar esta información para realizar mejoras en los procesos y materiales educativos.

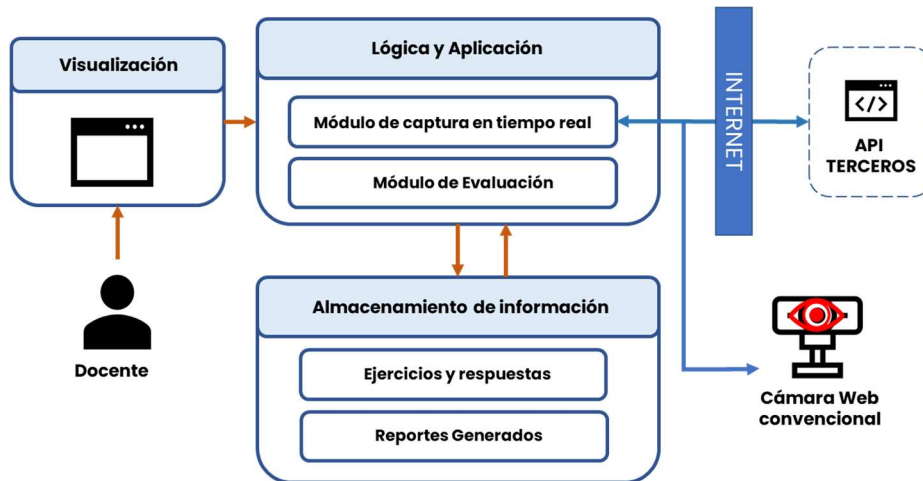


Fig. 2. Arquitectura del sistema propuesto.

Actualmente, para realizar este análisis de seguimiento ocular existen en el mercado diferentes dispositivos para el seguimiento de ojos tales como son Tobii-pro®, Eye-link®, Smart-eye®, Gaze-point®, por mencionar algunos (ver Tabla 1). Sin embargo, la adquisición de uno de estos instrumentos de seguimiento ocular profesional representa una inversión económica muy elevada para instituciones educativas y de investigación que deseen utilizar esta tecnología en sus estudios y proyectos, como se muestra en la Tabla 1.

Por lo tanto, existe la necesidad de buscar alternativas más económicas y accesibles para llevar a cabo este tipo de análisis. Una opción que surgió recientemente para el seguimiento ocular es el uso de cámaras web convencionales y software de seguimiento de ojos basado en visión artificial. Este enfoque utiliza algoritmos para procesar las imágenes capturadas por la cámara y determinar la posición de los ojos y los movimientos oculares del usuario.

La ventaja de esta alternativa es que la mayoría de las computadoras modernas ya están equipadas con cámaras web integradas, lo que significa que no se requiere una inversión adicional en hardware. Además, muchos de los programas de seguimiento de ojos basados en visión artificial están disponibles como software libre y de código abierto, lo que permite a los investigadores y desarrolladores personalizar y ajustar el software para satisfacer sus necesidades específicas.

3.2. Comparativa de herramientas de seguimiento ocular

En el campo del seguimiento ocular, existen diversas herramientas disponibles para llevar a cabo estudios y análisis de la actividad visual. Sin embargo, muchas de estas herramientas resultan ser costosas, lo que dificulta su acceso para aquellos interesados en realizar investigaciones o proyectos de manera independiente.

En este sentido, la Tabla 2 presenta una comparativa de herramientas de seguimiento ocular que utilizan una cámara web convencional en su versión gratuita. Estas

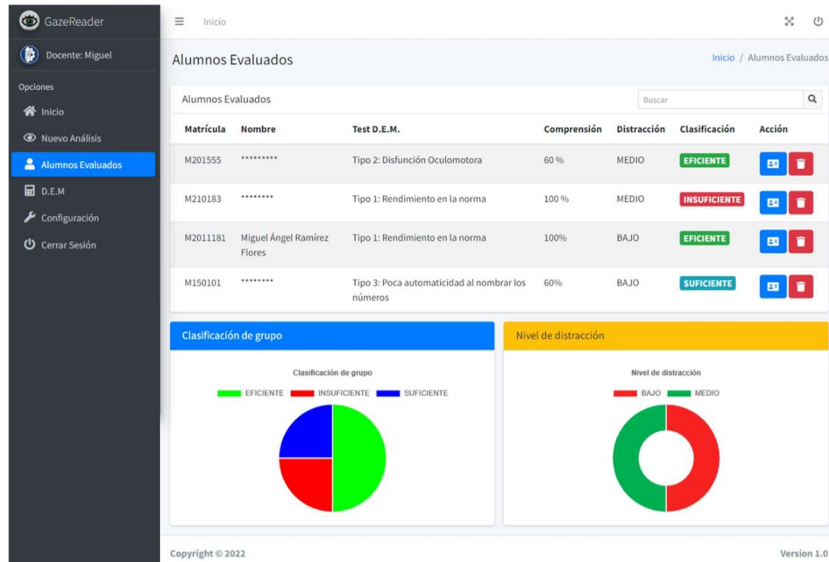


Fig. 3. Interface de usuario.

herramientas permiten a los usuarios llevar a cabo análisis de seguimiento ocular sin la necesidad de adquirir dispositivos costosos.

La comparación se basa en características importantes como tiempo de rastreo, facilidad de uso, compatibilidad con diferentes plataformas, entre otras. Aunque la precisión de estos sistemas de seguimiento de ojos basados en visión artificial aún no alcanza la de los dispositivos de seguimiento ocular profesionales, la tecnología está avanzando rápidamente y se espera que mejore con el tiempo.

Además, la accesibilidad y la facilidad de uso de estas soluciones de seguimiento de ojos las hacen ideales para estudios y proyectos a pequeña escala, como en el ámbito educativo y de investigación en ciencias sociales.

3.3. Elementos del sistema Web propuesto

El software propuesto se desarrolló con la finalidad de capturar, analizar y evaluar la actividad ocular de un usuario mientras realiza una lectura de comprensión en una computadora. Como se aprecia en la Figura 2, la arquitectura del sistema aquí propuesto se divide en diversos módulos que permiten la aplicación de técnicas de seguimiento de ojos basadas en visión artificial y obtener una estructura preliminar para evaluar el comportamiento y aprovechamiento del usuario a través de su mirada.

Luego de un análisis previo de tecnologías disponibles de desarrollo de software, se decidió utilizar el lenguaje de programación PHP y JavaScript para implementar las funcionalidades del sistema y la API GazeCloudAPI® para el módulo de captura en tiempo real mediante una cámara Web convencional.

Se decidió utilizar esta API en particular debido a su alta precisión en la localización de la posición ocular, el sistema de calibración integrado, así como su capacidad para

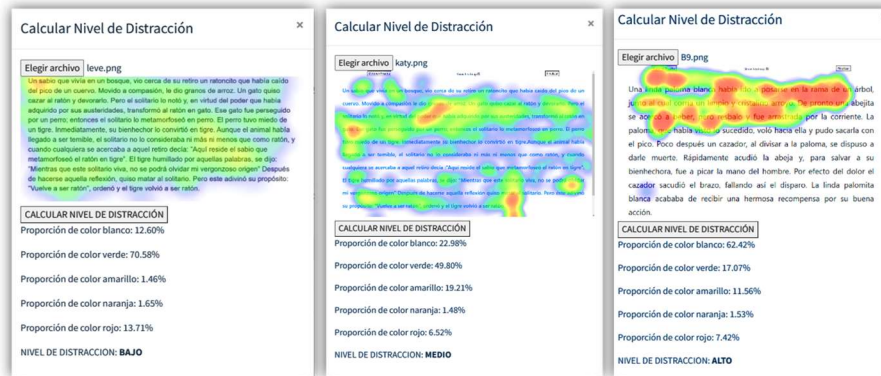


Fig. 4. Clasificador de mapas de calor por proporción de color.

ser implementada de manera rápida y eficiente en el sistema con respecto a las demás herramientas analizadas, como se muestra en la Tabla 2.

3.4. Prototipo del sistema

El sistema Web propuesto tiene como objetivo evaluar y clasificar el nivel de comprensión lectora de los estudiantes de secundaria en una escala de **EFICIENTE**, **SUFICIENTE** e **INSUFICIENTE** mediante el nivel de desarrollo oculomotor y la estimación del aprovechamiento en una lectura en computadora.

El sistema se basa en un panel de control para visualizar la información registrada, un conjunto de textos preparados acorde al nivel, un quiz de preguntas y respuestas, así como un sistema de calificación de resultados, todo ello implementado con lenguajes de programación como JavaScript y PHP, utilizando la base de datos MariaDB para almacenar los resultados de los estudiantes (Figura 3), y adoptando el modelo arquitectónico MVC (Modelo-Vista-Controlador).

El sistema utiliza técnicas de seguimiento ocular basadas en visión artificial mediante una cámara Web convencional y la implementación de una API para la obtención de datos en tiempo real mediante un mapa de calor sobre el comportamiento de lectura del estudiante.

El sistema de clasificación de imágenes se basa en la proporción de colores en la imagen, lo que permite determinar el nivel de distracción en una lectura de comprensión. Utilizando el mapa de calor generado por la API, se identifican las áreas de mayor actividad ocular y se analiza la proporción de colores presentes en esas áreas. Se establecen tres categorías de clasificación: **ALTO**, **MEDIO** Y **BAJO**, en función del nivel de distracción que presenta la imagen.

Para la clasificación de imágenes se utiliza un algoritmo de procesamiento de imágenes que analiza la distribución de los colores en cada píxel de la imagen. Se establecieron proporciones y combinaciones de colores personalizados en un rango que incluye blanco, verde, amarillo, naranja y rojo para determinar los límites entre las diferentes categorías de clasificación, como se observa en la Figura 4. A cada imagen

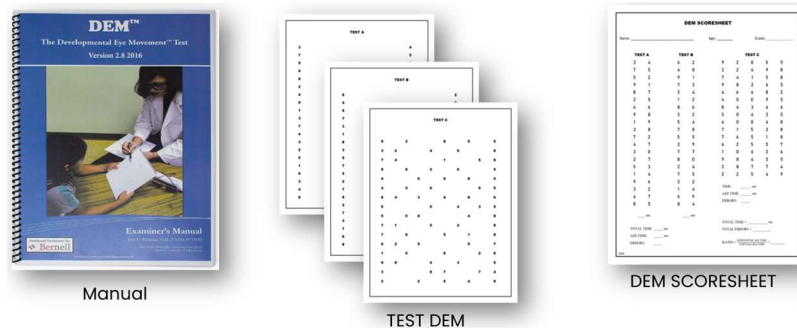


Fig. 5. The Developmental Eye Movement Test (Test DEM).

se le asigna una etiqueta que indica el nivel de distracción que presenta, según el color predominante en las áreas donde se enfoca la vista durante la lectura.

Una vez que las imágenes se clasificaron, se utilizan para analizar los patrones de distracción que se presentan durante la lectura, con el propósito de identificar los puntos críticos y ajustar los datos para lograr una evaluación automática precisa y mejorar las estrategias de enseñanza.

Asimismo, los colores en la imagen más intensos de rojo y naranja se relacionan con una distracción y el aumento en el tiempo de fijación en una zona determinada, lo que sugiere una baja velocidad lectora o desconocimiento de palabras en el texto. Por otro lado, los colores más claros, como el verde y el amarillo, indican una posición ocular correcta y una velocidad de lectura adecuada.

4. Presentación y análisis de datos

En esta sección se describe el caso de estudio desarrollado para evaluar el sistema propuesto. En primer lugar, se describe el lugar donde se llevó a cabo la prueba y se presentan las métricas utilizadas para evaluar el desempeño del sistema. Los resultados obtenidos se analizan y se comparan con las expectativas establecidas previamente. Estos resultados son fundamentales para determinar la eficacia del sistema propuesto y su capacidad para cumplir con los objetivos establecidos.

4.1. Caso de estudio

El caso de estudio se desarrolló en la Escuela Telesecundaria 2 de enero, ubicada en la comunidad de Huiloapan de Cuauhtémoc, Veracruz, en colaboración con dos maestras y una psicóloga. Cabe destacar que dicha escuela forma parte del programa de Unidades de Servicios de Apoyo a la Educación Regular (USAER), que busca proporcionar apoyo a estudiantes con necesidades educativas especiales.

En este caso de estudio, se contó con la colaboración de dos maestras responsables de los grupos analizados y una psicóloga, quienes desempeñaron un papel fundamental en la interpretación y validación de los resultados obtenidos.

Hubo un total de 38 alumnos de primer año de secundaria en la muestra, los cuales se distribuyeron en dos grupos de participantes con el propósito de evaluar su

desempeño en una actividad de comprensión lectora mediante el uso de un sistema de seguimiento ocular basado en visión por computadora.

Para llevar a cabo la evaluación de los alumnos se empleó el sistema desarrollado que implementa tecnología del seguimiento de la actividad ocular a través de una cámara web convencional. Y con el fin de medir su motricidad ocular, se utilizó el test de desarrollo ocular conocido como: The developmental eye movement test (DEM) (Figura 5).

Dicha prueba permite clasificar a los evaluados en cuatro tipos, según sus resultados y edad: Tipo 1, correspondiente al rendimiento en la norma; Tipo 2, relacionado con disfunción oculomotora; Tipo 3, caracterizado por poca automaticidad al nombrar los números; y Tipo 4, definido por deficiencias tanto en la automaticidad como en la función oculomotora.

Previamente, al inicio de las pruebas, se realizó una reunión de capacitación con los maestros y los estudiantes para la explicación detallada del uso del sistema y las instrucciones de la actividad. Además, se habilitó un espacio temporal en la biblioteca escolar para la realización de las pruebas, con el fin de evitar interrupciones y garantizar un ambiente adecuado para la realización de la actividad.

Posteriormente, con los datos obtenidos en las pruebas realizadas, se clasificó a los estudiantes según su estimación de aprovechamiento y desarrollo oculomotor en una escala de Eficiente, Suficiente e Insuficiente. Las maestras y la psicóloga participaron activa y colaborativamente en el desarrollo del proyecto, lo que resultó crucial para obtener datos relevantes para el sistema, así como de resultados precisos, la interpretación y validación adecuada de los mismos.

Estas profesionales aportaron su amplia experiencia y conocimiento en el ámbito educativo, lo que permitió una visión integral y contextualizada de los resultados obtenidos a través del seguimiento de la actividad ocular de los estudiantes en relación del aprovechamiento durante la actividad de comprensión lectora en computadora.

La labor de las maestras y la psicóloga incluyó no solo la interpretación de los datos obtenidos a través del seguimiento ocular, sino también la identificación de patrones, tendencias en el comportamiento y la motricidad ocular de los estudiantes.

Además, se encargaron de generar una clasificación de sus estudiantes acorde a su desempeño visto en clases y comparar los resultados obtenidos posteriormente a la implementación del sistema, así como de proponer recomendaciones y estrategias para mejorar el desempeño académico de los estudiantes en el área de comprensión lectora y desarrollo oculomotor.

4.2. Evaluación de métricas

Luego de la implementación de las pruebas mediante el sistema propuesto, se presenta en esta sección el análisis de resultados de los 38 alumnos de primer año de secundaria evaluados. Aquí se presentan los resultados obtenidos y se incluye la Tabla 3 que compara la clasificación otorgada por la profesora con la otorgada por la plataforma.

El análisis de estos resultados permite evaluar la efectividad del sistema en la clasificación del nivel de aprovechamiento de los estudiantes y su correlación con la actividad ocular durante la lectura.


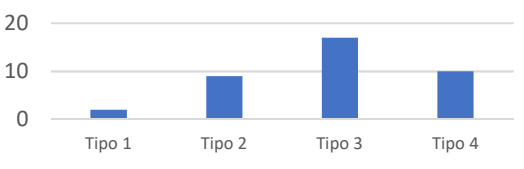
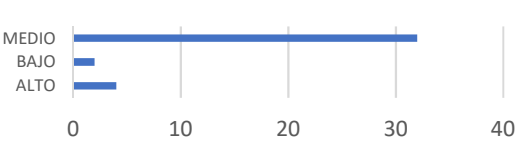
Tabla 3. Comparativa de clasificación.

Alumno	Clasificación otorgado por la profesora	Clasificación asignada por la plataforma
Alumno 1	Suficiente	Eficiente
Alumno 2	Suficiente	Suficiente
Alumno 3	Suficiente	Suficiente
Alumno 4	Suficiente	Suficiente
Alumno 5	Suficiente	Suficiente
Alumno 6	Suficiente	Suficiente
Alumno 7	Insuficiente	Insuficiente
Alumno 8	Eficiente	Eficiente
Alumno 9	Eficiente	Suficiente
Alumno 10	Eficiente	Eficiente
Alumno 11	Suficiente	Suficiente
Alumno 12	Eficiente	Eficiente
Alumno 13	Suficiente	Eficiente
Alumno 14	Suficiente	Suficiente
Alumno 15	Suficiente	Eficiente
Alumno 16	Suficiente	Eficiente
Alumno 17	Suficiente	Eficiente
Alumno 18	Suficiente	Eficiente
Alumno 19	Suficiente	Eficiente
Alumno 20	Suficiente	Eficiente
Alumno 21	Eficiente	Eficiente
Alumno 22	Suficiente	Eficiente
Alumno 23	Suficiente	Insuficiente
Alumno 24	Suficiente	Suficiente
Alumno 25	Insuficiente	Insuficiente
Alumno 26	Suficiente	Suficiente
Alumno 27	Eficiente	Eficiente
Alumno 28	Suficiente	Suficiente
Alumno 29	Eficiente	Eficiente
Alumno 30	Eficiente	Eficiente
Alumno 31	Eficiente	Suficiente
Alumno 32	Eficiente	Suficiente
Alumno 33	Insuficiente	Insuficiente
Alumno 34	Suficiente	Suficiente
Alumno 35	Suficiente	Suficiente
Alumno 36	Suficiente	Suficiente
Alumno 37	Suficiente	Suficiente
Alumno 38	Insuficiente	Insuficiente

Con los resultados obtenidos de la evaluación y clasificación, se realizó una comparación entre la clasificación hecha por las docentes y la generada por el sistema, y se encontró que la plataforma clasificó de manera similar a más del 65% de los estudiantes.

Esto sugiere que la plataforma puede clasificar a los estudiantes con un nivel significativo de similitud en comparación con la clasificación que obtienen en el aula, lo que demuestra que la implementación del sistema propuesto tiene un alto grado de

Tabla 4. Resultados obtenidos de la muestra.

Característica	Resultado
Clasificación del grupo	 <p>■ EFICIENTE ■ INSUFICIENTE ■ SUFICIENTE</p>
Tipo de desarrollo ocular (DEM) en la muestra	
Nivel de distracción durante la lectura	

precisión en la clasificación de los estudiantes y es viable para su implementación en entornos educativos a un costo accesible.

Los resultados estadísticos de la muestra, como la clasificación del grupo, nivel de distracciones, entre otras, se muestra en la Tabla 4. Además, se observó que el sistema propuesto demostró una mayor efectividad en la clasificación de los estudiantes en los niveles de **Suficiente** e **Insuficiente**.

Posteriormente a la evaluación, se identificaron algunos aspectos que podrían mejorar la precisión de la clasificación de los estudiantes, como el porcentaje de evaluación en los test DEM y el nivel de distracción. Para determinar las posibles causas de estos hallazgos, se realizó un análisis exhaustivo de los resultados, y se está trabajando en ajustes para el sistema de clasificación con el fin de mejorar la precisión en la clasificación de los estudiantes en los tres niveles.

5. Conclusiones y trabajo a futuro

El incremento constante de estudiantes en México con un bajo aprovechamiento es una problemática alarmante en el ámbito educativo. Uno de los principales factores relacionados con este bajo rendimiento escolar es la falta de comprensión lectora. En los últimos tiempos, los avances tecnológicos permiten invertir en investigación, desarrollo de sistemas y dispositivos para detectar patrones que afecten el aprendizaje de los estudiantes.

En este sentido, el uso de dispositivos de seguimiento ocular se considera una herramienta prometedora para ayudar a analizar y comprender la relación entre la actividad ocular y el aprendizaje de los alumnos y aunque los dispositivos de seguimiento ocular profesionales siguen siendo la opción más precisa y confiable, los

sistemas de seguimiento de ojos basados en visión artificial ofrecen una alternativa más accesible y económica para aquellos con un presupuesto limitado.

En este trabajo, se presentó un sistema Web como herramienta docente que ayuda a facilitar la identificación y obtención del comportamiento visual de los estudiantes a través de una cámara Web convencional, así como una aproximación de su comprensión durante la lectura en computadora, para clasificarlos en una escala de eficiente, suficiente e insuficiente de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de aprovechamiento lector y motricidad ocular.

La investigación contó con la participación de 38 alumnos del primer año de secundaria bajo el consentimiento de las autoridades escolares y la colaboración de 2 maestras y una psicóloga.

La principal ventaja de esta herramienta es su capacidad para permitir a los docentes evaluar, analizar y visualizar la actividad ocular, así como el nivel de aprovechamiento de los estudiantes durante la lectura en computadora, lo que permite detectar problemas de atención y aprendizaje en los estudiantes de igual manera tomar medidas tempranas para mejorar su desempeño académico y la posibilidad de integrar el sistema en el plan de estudios, para que los docentes puedan utilizarlo como una herramienta de diagnóstico y seguimiento en el aula.

Como investigaciones futuras, se tiene la intención de profundizar en el análisis y detección de trastornos visuales que afecten el aprendizaje de los estudiantes en todos los niveles educativos mediante la implementación de dispositivos de seguimiento ocular accesibles y rentables.

También se pretende incorporar diversos algoritmos de aprendizaje automático con el fin de mejorar aún más la eficiencia y la validez de los resultados obtenidos a través del sistema. Esta tarea será esencial para poder identificar problemas visuales tempranos en los estudiantes y proporcionar intervenciones adecuadas para garantizar un desempeño académico óptimo.

Agradecimientos. Este trabajo de investigación fue financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) y la Secretaría de Educación Pública (SEP) de México. De igual manera, se agradece al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por el apoyo para la realización de este trabajo.

Referencias

1. Salinas, D., Moraes, C., Schwabe, M.: Programa para la evaluación internación de alumnos (PISA) PISA 2018- Resultados. OECD 2019, vol. I-III, pp. 1–12 (2019) https://www.oecd.org/pisa/publications/PISA2018_CN_MEX_Spanish.pdf
2. The Padula institution of vision rehabilitation: Attention deficit disorder (ADD) and vision problems (2019) padulainstitute.com/attention-deficit-disorder-vision-problems/
3. Guo, W., Cheng, S.: An approach to reading assistance with eye tracking data and text features. In: Adjunct of the 2019 International Conference on Multimodal Interaction, Association for Computing Machinery, no. 7, pp. 1–7 (2019) doi: 10.1145/3351529.3360659
4. Cheng, G., Poon, L., Lau, W., Zhou, R.: Applying eye tracking to identify students' use of learning strategies in understanding program code. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Education and Multimedia Technology, Association for Computing Machinery, pp. 140–144 (2019) doi: 10.1145/3345120.3345144

5. Zheng, Y., Mao, J., Liu, Y., Ye, Z., Zhang, M., Ma, S.: Human behavior inspired machine reading comprehension. In: Proceedings of the 42nd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval, Association for Computing Machinery, pp. 425–434 (2019) doi: 10.1145/3331184.3331231
6. Ivanović, M., Klačnja-Milićević, A., Ivković, J., Porta, M.: Integration of eye tracking technologies and methods in an E-learning system. In: Proceedings of the 8th Balkan Conference in Informatics, Association for Computing Machinery, no. 29, pp. 1–4 (2017) doi: 10.1145/3136273.3136278
7. Ahn, S., Kelton, C., Balasubramanian, A., Zelinsky G.: Towards predicting reading comprehension from gaze behavior. In: ACM Symposium on Eye Tracking Research and Applications, Association for Computing Machinery, no. 32, pp. 1–5 (2020) doi: 10.1145/3379156.3391335
8. Chang, C., Chen, C., Lin, Y.: A visual interactive reading system based on eye tracking technology to improve digital reading performance. In: 2018 7th International Congress on Advanced Applied Informatics, pp. 182–187 (2018) doi: 10.1109/IIAI-AAI.2018.00043
9. Copeland, L., Gedeon, T.: Measuring reading comprehension using eye movements. In: IEEE 4th International Conference on Cognitive Infocommunications, pp. 791–796 (2013) doi: 10.1109/CogInfoCom.2013.6719207
10. Lin, W., Kotakehara, Y., Hirota, Y., Murakami, M., Kakusho K., Yueh, H.: Modeling reading behaviors: An automatic approach to eye movement analytics. IEEE Access, vol. 9, pp. 63580–63590 (2021) doi: 10.1109/ACCESS.2021.3074913
11. Bottos, S., Balasingam, B.: Tracking the progression of reading using eye-gaze point measurements and hidden Markov models. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 69, no. 10, pp. 7857–7868 (2020) doi: 10.1109/tim.2020.2983525
12. Li, J., Ngai, G., Leong, H. V., Chan S.: Your eye tells how well you comprehend. In: IEEE 40th Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC), pp. 503–508 (2016) doi: 10.1109/COMPSAC.2016.220
13. Aware biometrics: Reconocimiento del iris. Aware Trusted since 1993 (2021) <https://www.aware.com/es/reconocimiento-del-iris/>
14. Schall, A., Romano-Bergstrom, J.: Introduction to eye tracking. Eye Tracking in User Experience Design, pp. 3–26 (2014) doi: 10.1016/b978-0-12-408138-3.00001-7